

# **1 Trabajo de grado**

## **MACROPROYECTO:**

### **SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE REGULACIÓN Y SOPORTE EN SISTEMAS AGRÍCOLAS CAFETEROS**

**Captura de carbono de sistemas agrícolas productivos con  
predominancia de cultivo de café**

**Estudiante**

**Paula Andrea Soto Quintero**

**Director**

**Ángela María Arango**

**Especialización en Gestión Ambiental Local**

**Facultad de Ciencias Ambientales**

**Universidad Tecnológica de Pereira**

**Pereira, 2020**

## TABLA DE CONTENIDO

1	RESUMEN .....	3
2	INTRODUCCIÓN.....	4
3	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	7
4	JUSTIFICACIÓN.....	10
5	MARCO TEORICO .....	13
6	OBJETIVOS.....	15
6.1	Objetivo general .....	15
6.2	Objetivos específicos.....	15
7	METODOLOGIA.....	16
8	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19
8.1	Compilación de información secundaria relacionada con estudios sobre captura de carbono en sistema agrícola productivo de cultivo de café a libre exposición y con sistemas agroforestales. ....	19
8.2	Análisis comparativo de almacenamiento de carbono entre los sistemas seleccionados. ....	23
8.2.1	Carbono almacenado en biomasa del suelo y biomasa aérea.....	24
8.3	Eficiencia en la producción de biomasa aérea y subterránea entre los sistemas seleccionados. ....	9
8.3.1	Carbono Aéreo. ....	9
8.3.2	Carbono Suelo.....	1
9	CONCLUSIONES.....	1
10	RECOMENDACIONES .....	3
11	BIBLIOGRAFIA .....	4
11.1	Webgrafía .....	10

## LISTADO DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Estructura General de la metodología. ....	16
<b>Figura 2.</b> Relación de documentos revisados que aplican o no aplican para la investigación sobre captura de carbono. ....	20
<b>Figura 3.</b> Relación de tipo de documentos revisados para la investigación sobre captura de carbono. ....	20
<b>Figura 4.</b> Relación por rango de años de los documentos encontrados para la investigación sobre captura de carbono. ....	21
<b>Figura 5.</b> Relación de documentos encontrados por país para la investigación sobre captura de carbono. ....	22
<b>Figura 6.</b> Porcentaje de documentos que aplican a la investigación, discriminados por sistemas evaluados. ....	23
<b>Figura 7.</b> Comparación de resultados de carbono Aéreo ( $t\ C\ ha^{-1}$ ) por sistema estudiado. ....	1
<b>Figura 8.</b> Comparación de resultados de carbono del Suelo ( $t\ C\ ha^{-1}$ ) por sistema estudiado. ....	1
<b>Figura 9.</b> Comparación de resultados de carbono del Suelo ( $t\ C\ ha^{-1}$ ) por sistema estudiado. ....	2

## **2 RESUMEN**

La presente investigación efectuó una comparación del almacenamiento de carbono en la biomasa aérea y subterránea de dos sistemas de café a libre exposición y con sistemas agroforestales, como servicio ambiental de regulación; mediante la revisión de información, compilación y análisis de textos de diferentes bases de datos, que permitieron definir el estado de arte documental y así determinar la eficiencia en la producción de biomasa y captura de carbono entre los sistemas seleccionados.

Los sistemas seleccionados tuvieron en cuenta los resultados obtenidos de diferentes estudios a nivel nacional como internacional; principalmente de países productores de café; los cuales permitieron evaluar la cuantificación de carbono fijado y almacenado, comprobando su eficiencia, corroborando la hipótesis planteada en la presente investigación y determinando que en promedio los sistemas agroforestales almacenan más carbono que los sistemas correspondientes al café a libre exposición; más del 90% del carbono almacenado en los sistemas de producción estudiados, corresponden al carbono del suelo; encontrándose que los factores principales que determinan la tasa de acumulación de carbono en el suelo son la cantidad, calidad y la entrada de materia orgánica (Post y Kwon, 2000 ); al igual que factores como las propiedades físico-químicas del suelo, antecedentes del uso del suelo, dinámica del ingreso y egresos del carbono en los sistemas, entre otros y que los aportes de carbono, surgen principalmente por caída de hojarasca, mortalidad y exudación de raíces finas.

En cuanto al carbono aéreo, los árboles de sombra son los que aportan más del 60% de la biomasa aérea total, al igual que los SAF con rangos de altura entre 5-10m; mientras que el café a libre exposición solar con rangos de altura <5 m, la mayor parte de la biomasa y el carbono aéreo es aportada por la hojarasca, ya que tanto el cultivo de café como los árboles de sombra son muy pequeños y no han desarrollado la cantidad de biomasa existente en otros sistemas.

### 3 INTRODUCCIÓN

El almacenamiento y la fijación de carbono, es uno de los servicios ambientales de los ecosistemas forestales y agrícolas (Brown et al, 1984; Segura, 1997); convirtiéndose en un gran potencial para mitigar los efectos del cambio climático; debido al contenido de carbono en las diferentes especies de plantas que conviven simultáneamente en ellos. En ese sentido, los bosques tropicales, las plantaciones forestales y las prácticas agroforestales, y en general, aquellas actividades que lleven a la ampliación de una cobertura vegetal permanente pueden cumplir la función de " sumideros de carbono" (Cuéllar et al, 1999).

Una de las estrategias adoptadas por el Gobierno Colombiano a través del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, es la co-financiación de proyectos que buscan estimar el "Potencial como sumidero de carbono por especies forestales nativas e introducidas"; al igual que hacer parte de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y el protocolo de Kyoto, ratificados en los años 1994 y 2005 respectivamente, mecanismos de acción, que buscan lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, impidiendo y reduciendo prácticas antropogénicas en el sistema climático y por el contrario, implementando estrategias que conduzcan a la reducción de las emisiones de GEI, tales como, el establecimiento de plantaciones de especies que tienen un alto potencial de fijación del dióxido de carbono atmosférico.

En general, los bosques almacenan carbono en la biomasa aérea y subterránea de los árboles (biomasa viva), en la necromasa (masa muerta) y en el suelo (IPCC 2007). De acuerdo con Young (1997), la producción de biomasa aérea en diferentes SAF y regiones ecológicas varía de  $2.3 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  a  $48 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ , dependiendo del número de componentes, estratos y arreglos espaciales y temporales. La producción de biomasa subterránea puede variar de  $1 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  a  $4.5 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ . Sin embargo, la mayoría de los países no tienen información detallada y relacionada con los contenidos

de carbono asociados a la biomasa aérea de sus bosques naturales y de los sistemas agroforestales, lo cual representa una barrera para cualquier iniciativa que se quiera desarrollar (DeFries et al. 2007).

En el caso particular de Colombia, la información relacionada con las existencias de carbono en los sistemas agroforestales y bosques naturales es en general escasa, y ha sido estimada con diferentes técnicas y métodos. Además, se encuentra fragmentada en varias instituciones, razón por la cual se desconoce el potencial del país para poder acceder a este tipo de mecanismos de financiación por conservación. Si bien el sector cafetero en conjunto con empresas del sector forestal comercial, ha venido desarrollando modelos que permiten calcular el crecimiento y acumulación de carbono en algunas especies asociadas, es necesario integrar este conocimiento bajo esquemas temporales y espaciales de análisis.

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo principal el comparar el almacenamiento de carbono en la biomasa aérea y subterránea de dos sistemas de café a libre exposición y con sistemas agroforestales, como servicio ambiental de regulación; mediante la revisión documental, que permita obtener información sobre la captura y almacenamiento de carbono no sólo para el cultivo del café, sino también para otras especies que se encuentren asociadas al sistema productivo cafetero; conocer los resultados obtenidos por los diferentes autores en sus estudios, las metodologías aplicadas, las especies evaluadas y las recomendaciones dadas.

Igualmente, Compilar información secundaria relacionada con estudios sobre captura de carbono en sistema agrícola productivo de cultivo de café a libre exposición y con sistemas agroforestales; Efectuar un análisis comparativo de almacenamiento de carbono entre los sistemas seleccionados en estudios realizados a nivel nacional e internacional y Determinar la eficiencia en la producción de biomasa aérea y subterránea entre los mismos. Se espera que los resultados obtenidos faciliten la consolidación de estrategias de conservación a nivel nacional, regional y local, e involucren el pago por servicios

ambientales, por el potencial que tienen estos sistemas agroforestales y de cultivos para la captación de carbono y, por ende, la mitigación del cambio climático.

## **4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Los altos niveles de concentración de algunos gases en la atmósfera, como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), producto del desarrollo industrial, el uso y quema de combustibles fósiles, el crecimiento poblacional, la expansión de las actividades productivas que traen consigo la deforestación y el cambio de uso de la tierra, han provocado una intensificación del efecto invernadero natural del planeta y por ende, el calentamiento global; lo que genera la necesidad de adoptar medidas que permitan mitigar sus efectos de manera sostenible.

De esta manera los bosques y sistemas agroforestales juegan un rol importante no solo como factor de desarrollo de un país y de sus modelos de sostenibilidad, sino que adquieren protagonismo mundial por su probable reconocimiento como sumideros en los sistemas contables de los ciclos de carbono. El debate actual se intensifica alrededor de los beneficios que los Sistemas Agroforestales pueden proporcionar, más allá de sus funciones productivas; el de los denominados “servicios ambientales”. Los árboles, base de los sistemas agroforestales, juegan un papel importante en el ciclo global del carbono, porque cuando una planta crece, progresivamente acumula  $\text{CO}_2$  y lo convierte en biomasa. Si esta biomasa es almacenada en forma estable, se captura y retiene una significativa cantidad de carbono de la atmósfera durante mucho tiempo (Beer et al, 2003).

Existe interés de identificar los beneficios ambientales de los sistemas agroforestales de café con y sin árboles, dada la importancia económica que posee el cultivo de café a nivel nacional e internacional, y que las actividades de estos sistemas por su propia naturaleza, modifican los ecosistemas naturales para ser convertidos en agroecosistemas, cuya productividad se orienta hacia el suministro de uno o varios servicios de importancia económica (Fournier, 1996). Gran parte de los sistemas de producción del café en Colombia, se caracterizan por tener árboles de usos múltiples asociados al



cultivo, contribuyendo a reducir las emisiones de GEI, al evitar que el carbono almacenado en la biomasa vegetal y del suelo se emita a la atmósfera.

Pese a la importancia que tienen los SAF en mitigar el exceso de CO<sub>2</sub> de la atmósfera, en Colombia son pocos los estudios sobre el potencial de fijación y almacenamiento de carbono en estos sistemas de producción, lo cual representa un limitante tanto a los productores como al país, para desarrollar mecanismos de compensación por los bienes y servicios ambientales que estos sistemas generan. Pocos estudios se han realizado para determinar cómo los pagos por el secuestro de carbono afectarán el ingreso de la finca y los cambios en el uso de la tierra (Ruiz 2002).

La presente investigación aporta información sobre la contribución y potencial de dos sistemas de café a libre exposición y con sistemas agroforestales, como servicio ambiental sostenible, en la fijación y almacenamiento de carbono; información que determinó la eficiencia de los sistemas seleccionados en la producción de biomasa y captura de carbono y servirá de línea base para el manejo agroforestal en el control de los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera, contribuyendo de igual manera, al mejoramiento de los ingresos de los productores, por los aportes que se pueden captar por estos servicios.

Acorde a la revisión documental realizada, se determinó que el sistema de producción SAF café, almacena más carbono comparado con el sistema Café a libre exposición solar; y que más del 90% del carbono almacenado corresponden al carbono del suelo, como principal fuente de almacenamiento; encontrándose que los factores principales que determinan la tasa de acumulación de carbono en el suelo son la cantidad, calidad y la entrada de materia orgánica (Post y Kwon, 2000); al igual que factores como las propiedades físico-químicas del suelo, antecedentes del uso del suelo, dinámica del ingreso y egresos del carbono en los sistemas, entre otros y que los aportes de carbono, surgen principalmente por caída de hojarasca, mortalidad y exudación de raíces finas; lo cual corrobora la hipótesis planteada en la presente investigación.



## 5 JUSTIFICACIÓN

La preocupación por los diferentes fenómenos ambientales, producto del cambio climático en el planeta, han conllevado al desarrollo de diferentes estudios que evalúan el riesgo originado por las actividades humanas, la industrialización, la contaminación, el uso de combustibles fósiles y la tala de bosques, que han contribuido a la acumulación de Gases de Efecto Invernadero (GEI), señalados como la causa principal del problema.

Es así como, diferentes países acordaron en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, el Protocolo de Kioto; creado para reducir las emisiones de gases de efecto (GEI) invernadero que causan el calentamiento global y promover el crecimiento sustentable de los países en desarrollo; instrumento que ha logrado que los gobiernos suscribientes establezcan leyes y políticas para cumplir sus compromisos ambientales, que las empresas tengan al medio ambiente en cuenta al tomar decisiones de inversión y que se fomente la creación del mercado del carbono, cuyo fin es lograr la reducción de emisiones al menor costo.

Según Schimel (1995), existe un déficit en la captura del carbono al comparar las cantidades de este gas emitido (combustibles fósiles, industria del cemento y cambio en el uso del suelo), que es de 7.1 Gton C/año, versus los sumideros (atmósfera, océano, crecimiento de bosques), que es de 5.7 Gton C/año; el déficit resultante es de 1.4 Gton C/año. En este sentido, a escala mundial se ha identificado como una línea necesaria de acción, la mitigación del incremento de bióxido de carbono a través del aumento de los sumideros, es decir, de reservorios de dicho gas y también una reducción de las emisiones (Phillips et al., 1998; Trexler y Haugen, 1995).

El almacenamiento y la fijación de carbono es uno de los servicios ambientales de los ecosistemas forestales y agroforestales más relevantes. Los cafetales con sombra son sistemas agroforestales con potencial de ser incorporados en la venta de almacenamiento y captura de carbono. El café en Colombia es uno de los principales productos de

exportación y representa el 22% del PIB agrícola; adicionalmente, los beneficios ambientales del cultivo del café y sus diferentes sistemas de producción incluyen conservación de la biodiversidad, mejoramiento de las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo y mantenimiento del microclima (FNC, 2013).

El almacenamiento de CO<sub>2</sub> depende de la especie arbórea y densidad de siembra, la materia orgánica presente en el suelo, edad de los componentes, tipos de suelos, características del sitio, factores climáticos y del manejo silvicultural al que se vea sometido (Segura, 1999; Cubero y Rojas, 1999). En Colombia, los cultivos de café tienen una relevante importancia en los órdenes económico, social y ecológico.

En esta investigación mediante la búsqueda de literatura y revisión documental, se resaltó el potencial que tienen los agroecosistemas de café a libre exposición y con sistemas agroforestales para el almacenamiento y captura de carbono, que permitió determinar la eficiencia en la producción de biomasa aérea y subterránea entre los sistemas seleccionados; lo cual representa, una primera aproximación para la negociación del servicio ambiental de captura de carbono de las áreas cafetaleras, que por sí mismas presentan una estructura de sotobosque, contribuyendo así, al mejoramiento de los ingresos de los productores, por los aportes que se pueden captar por estos servicios.

De igual forma, este trabajo de investigación es válido para la Especialización en Gestión Ambiental Local, teniendo en cuenta que existe una problemática ambiental identificada, hay una búsqueda de soluciones a la misma y se resaltan las potencialidades ambientales del sistema productivo, logrando una gestión ambiental positiva, por el uso de alternativas sostenibles. Dicha problemática es sobre la emisión de Gases Efecto Invernadero y el calentamiento global que actualmente afecta el planeta tierra y cómo a través del uso de los sistemas agroforestales y del cultivo del café, se logra la disminución de estos efectos adversos a la atmósfera por la captura y almacenamiento de Carbono, reduciendo los niveles de contaminación, logrando procesos de gestión ambiental eficientes, que permiten resaltar las potencialidades y

manejo sostenible del sistema productivo a la vez que se conserva y protegen los recursos naturales existentes.

## **6 MARCO TEORICO**

El calentamiento global y cambio climático son fenómenos provocados total o parcialmente por el aumento en la concentración de gases de invernadero en la atmósfera, principalmente el CO<sub>2</sub> relacionado directa o indirectamente con actividades humanas como el uso de combustibles fósiles y deforestación (González, 2013).

Las emisiones de CO<sub>2</sub> procedente de la combustión de combustibles fósiles y los procesos industriales contribuyeron en torno al 78% del aumento total de emisiones de GEI. A nivel mundial, el crecimiento económico y el crecimiento demográfico son los motores más importantes de los aumentos en las emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas de la quema de combustibles fósiles; ante esto la evidencia más sólida y completa de los impactos observados del cambio climático corresponde a los sistemas naturales (IPCC, 2014).

Los sistemas agroforestales (SAF), de acuerdo con Nair (1993), se definen como aquellos sistemas de uso de la tierra donde especies leñosas perennes se usan y manejan junto con cultivos agrícolas y animales, donde se producen interacciones ecológicas y económicas entre los componentes que son resultado de los arreglos espaciales y temporales. Los sistemas agroforestales también son importantes reservorios de carbono en el tiempo, mismos que dependen de la productividad, la finalidad para la cual se hayan diseñado y las condiciones ambientales bajo las que se desarrollan, además de ser una fuente de alimento para los dueños y proporcionar alimento para animales.

Investigaciones recientes sugieren que la calidad del manejo forestal puede hacer una contribución fuerte a controlar los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera; otras actividades de uso de la tierra que pueden contribuir a este fin son: la conservación de bosque en peligro de deforestación, rehabilitación de bosques, forestación, reforestación, la agricultura y la agroforestería (Duncan et al., 1999; Fischer et al, 1999). La captura de carbono en cafetales tiene su base en la agenda ambiental, su estrategia de

comercialización de servicios puede potencialmente ser un instrumento articulado a la estrategia de combate de la pobreza rural, e impulsar con ello, una reconversión productiva hacia esquemas agroecológicos, en donde se combinen la producción y la venta de servicios en el ámbito nacional y global (Cuéllar et al., 1999).

La acumulación de carbono secuestrado es más evidente en la biomasa de árboles y arbustos; las cantidades de almacenamiento de carbono en la biomasa dependen de la proporción de árboles presentes y del tamaño del árbol (Montagnini y Nair, 2004). Los principales factores que actúan sobre la evolución de la materia orgánica del suelo (MOS) y su estado de residencia, conciernen al tipo de vegetación presente, ingreso de residuos, composición química de los materiales, factores climáticos (temperatura y humedad) y propiedades del suelo, como textura, contenido y mineralogía de arcillas, y nivel de acidez presente (Stevenson, 1994).

## **7 OBJETIVOS**

### **7.1 Objetivo general**

Comparar el almacenamiento de carbono en la biomasa aérea y subterránea de dos sistemas de café a libre exposición y con sistemas agroforestales, como servicio ambiental de regulación.

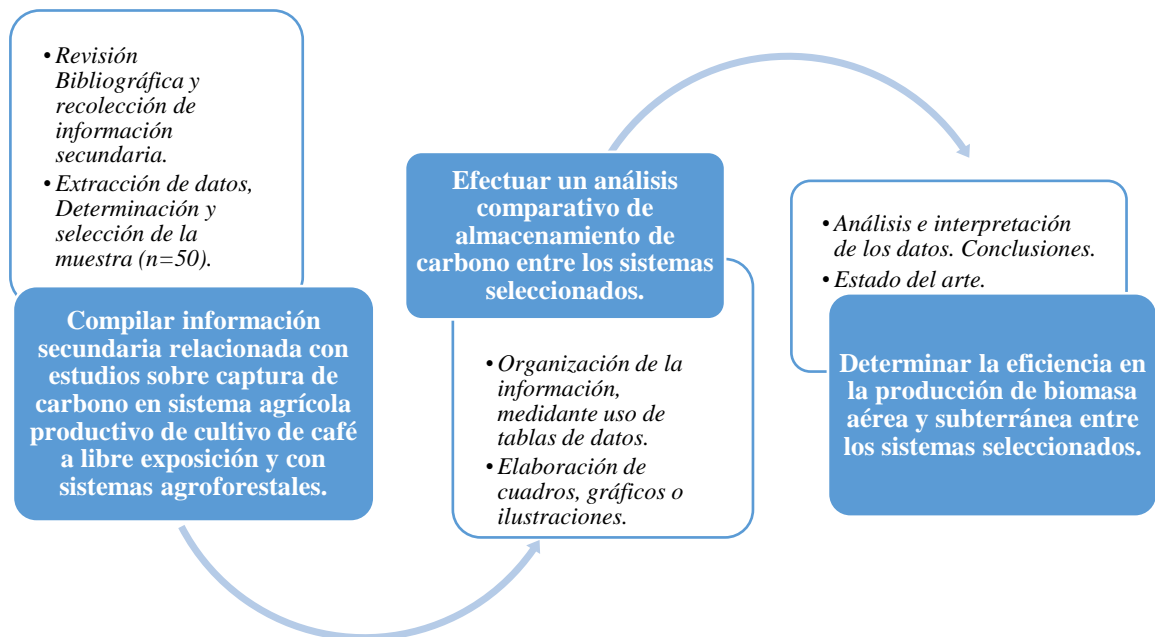
### **7.2 Objetivos específicos**

- Compilar información secundaria relacionada con estudios sobre captura de carbono en sistema agrícola productivo de cultivo de café a libre exposición y con sistemas agroforestales.
- Efectuar un análisis comparativo de almacenamiento de carbono entre los sistemas seleccionados.
- Determinar la eficiencia en la producción de biomasa aérea y subterránea entre los sistemas seleccionados.



## 8 METODOLOGIA

La presente investigación se realizó a través de un diseño cualitativo e interpretativo, de tipo documental, la cual permitió determinar el procedimiento de selección, acceso y registro de la muestra documental y se trabajar por etapas, con base a los objetivos planteados, las cuales se detallan en la figura 1.



**Figura 1.** Estructura General de la metodología.

*Revisión Bibliográfica.* Se realizó una revisión sistemática de documentos como revistas de investigación científica tales como ScienceDirect, Scielo, Scopus, Cenicafe, CATIE, entre otras; bases de datos de centros de investigación científica en universidades, sitios web, Google Scholar y demás información necesaria sobre Captura de carbono de sistemas agrícolas productivos, especialmente del cultivo de café y agroforestales. Seguidamente, se analizaron las referencias bibliográficas de los artículos seleccionados con el fin de rescatar otros estudios potencialmente incluíbles para la revisión.

La búsqueda de literatura se enfocó exclusivamente a el almacenamiento de carbono en la biomasa aérea y subterránea de dos sistemas de café a libre exposición y con sistemas agroforestales; lo que permitió excluir información o artículos relacionados con otros sistemas o cultivos; para ello, se utilizó se utilizaron palabras claves y términos específicos del tema a investigar, siendo éstas: captura carbono, almacenamiento carbono, fijación carbono, sistema café, monocultivo café, sistema agroforestal, biomasa aérea y subterránea, efecto invernadero, cambio climático.

*Extracción de datos.* Se efectuó la búsqueda de documentos como tesis, artículos de investigación, monografías, informes, programas, memorias; encontrándose un total de 55 documentos, a los cuales se les revisó los abstracts, para determinar su relevancia para la investigación, lo que permitió la exclusión de 22 de ellos, para finalmente, seleccionar 33 documentos, que sirvieron de insumo para el análisis correspondiente.

*Organización de la información.* Se organizó de manera sistemática la documentación encontrada, a través del uso de tablas de datos que clasificó la información por documento disponible, tipo de documento, nombre del documento, autores, año de publicación, entidad, objetivo, sistemas utilizados, ubicación, metodología, componentes de almacenamiento de carbono, resultados obtenidos, aplicabilidad del documento en la investigación, contenido de carbono en SAF, contenido de carbono solo café.

*Análisis de los datos.* De las revisiones sistemáticas se extrajo información sobre autoría, año, ubicación, finalidad, fuentes de información, planteamiento del autor, medida de resultado, conclusiones y recomendaciones; información que permitió captar, evaluar, seleccionar y sintetizar la información relevante en el contenido de los documentos, que permitió el análisis de sus resultados y efectuar comparaciones con otros autores para determinar el sistema más efectivo. Esta condensación y análisis de información, se logró plasmar a través de gráficos y cuadros para la interpretación de los datos obtenidos.

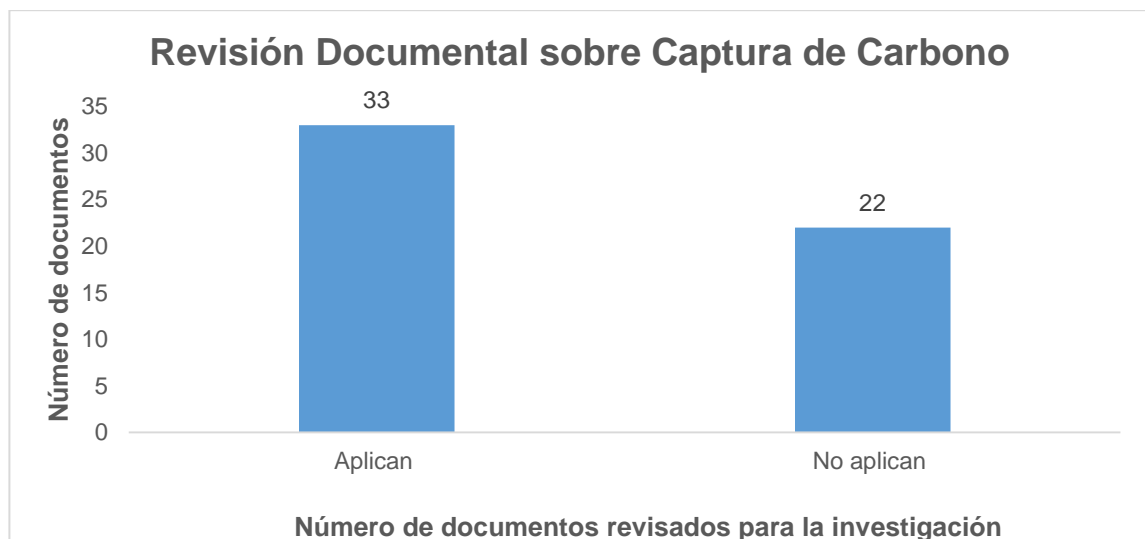
*Estado del arte.* Se efectuó una descripción de lo planteado por diferentes autores representativos a partir de la literatura existente y recopilada en las fuentes documentales.

## 9 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 9.1 Compilación de información secundaria relacionada con estudios sobre captura de carbono en sistema agrícola productivo de cultivo de café a libre exposición y con sistemas agroforestales.

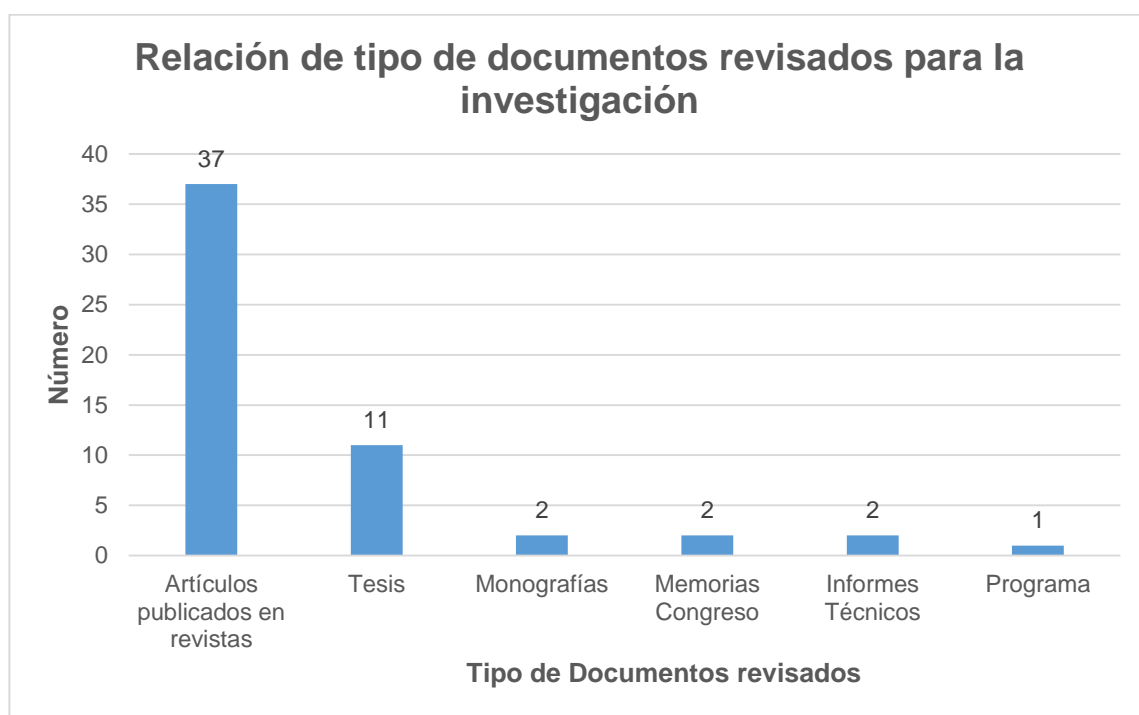
Para el cumplimiento del primer objetivo de la presente investigación, se efectuó una base de datos que consolida la información relacionada con los 55 documentos encontrados en la revisión bibliográfica, la cual puede ser verificada en detalle, en los anexos (Ver anexo 1).

De acuerdo a la revisión documental en las diferentes fuentes descritas, se logró encontrar 55 documentos de diverso tipo que se relacionaron con el tema de investigación; de los cuales 22 documentos no aplican y 33 documentos aplican directamente a la investigación, dado que están relacionados con el servicio de captura y almacenamiento de carbono en cafetales y sistemas agroforestales; por su aporte a los temas de Efecto de Invernadero en la atmósfera y mitigación al cambio climático; dentro de este grupo de documentos se encuentra información relevante que no necesariamente se mide a través de un estudio con levantamiento de información primaria en campo, si no de documentos compilatorios que contienen análisis sobre el tema objeto de investigación, como se evidencia en la figura 1.



**Figura 2.** Relación de documentos revisados que aplican o no aplican para la investigación sobre captura de carbono.

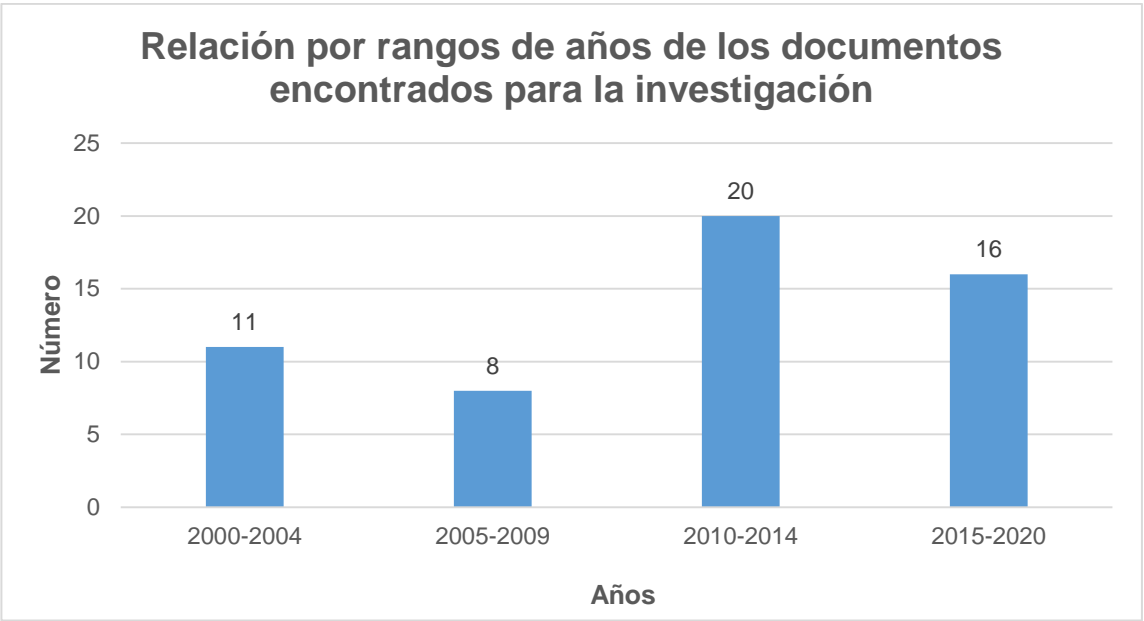
Los documentos encontrados en la búsqueda bibliográfica correspondieron en su mayoría a artículos de investigación publicados en revistas (37), seguido de las tesis (11) y en menor proporción monografías, memorias de congreso e informes (2) y programas (1), como se observa en el gráfico 2. Las fuentes de información que sobresalieron en esta revisión fueron ScienceDirect (base de datos), Scielo (base de datos), Cenicafe (publicaciones página web), CATIE (repositorio institucional).



**Figura 3.** Relación de tipo de documentos revisados para la investigación sobre captura de carbono.

De igual forma, los documentos fueron clasificados por rango de años, desde el año 2000 al 2020, lográndose identificar que en el período 2010-2014 se realizaron 20 estudios y en el período 2015-2020 se han realizado 16, siendo los períodos más representativos; para el período 2000-2004 se encontraron 11 estudios y por último el período comprendido entre 2005-2009 con 8, como se muestra en la figura 3. Cabe resaltar que para los años 2007, 2009 y 2010, no se encontraron estudios o documentos relacionados con la presente investigación; para el año 2014 se encontró el mayor

número de documentos (8), seguido de 2011 con 5 documentos; los años 2004, 2006, 2013 y 2015 con 4 documentos cada uno, el resto de los años fluctuó entre 2 y 3 documentos.



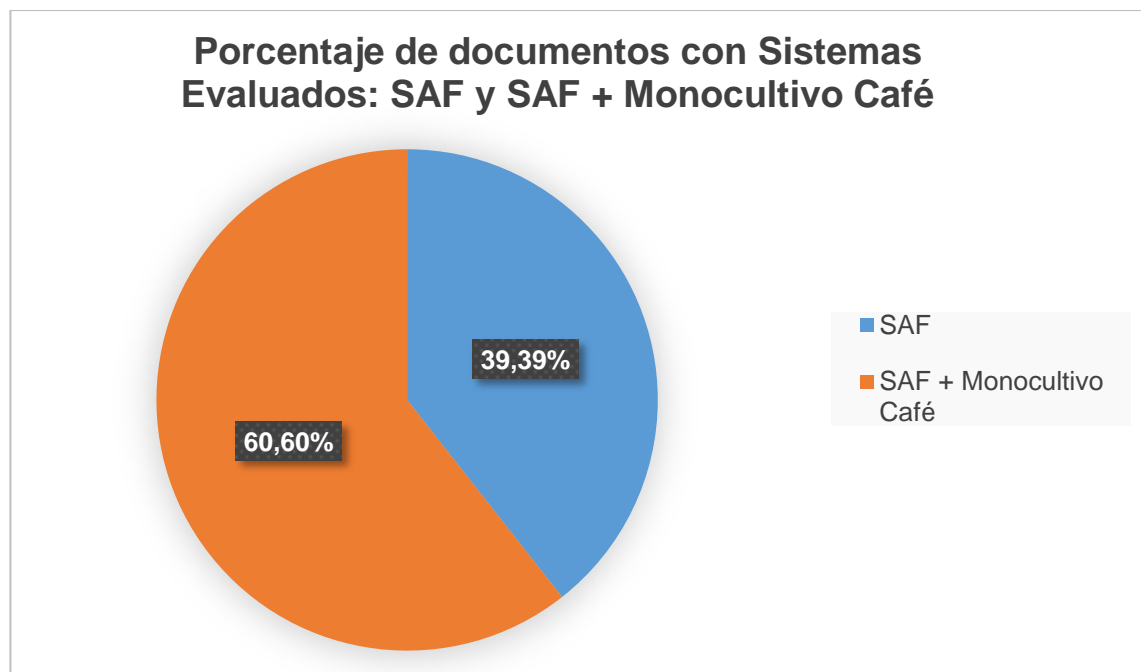
**Figura 4.** Relación por rango de años de los documentos encontrados para la investigación sobre captura de carbono.

Así mismo, se efectuó una relación de los documentos encontrados por país, donde se llevaron a cabo los estudios o investigaciones, siendo Colombia el país más representativo con 18, seguido de Costa Rica con 12 y México con 9 como se evidencia en la figura 4; es de resaltar como estas investigaciones se han desarrollado más en países de Centro América como Nicaragua, México y Costa Rica y en Sur América, como Brasil, Ecuador, Chile, Colombia y Perú, regiones con gran representatividad o presencia de cultivos de Café. Igualmente, se encontró en Indonesia con (1), África con (4) y un estudio realizado para los continentes de Oceanía, Asia y América.



**Figura 5.** Relación de documentos encontrados por país para la investigación sobre captura de carbono.

De los 33 documentos que aplican a la presente investigación, el 60.60% corresponden a estudios sobre captura de carbono en sistema agrícola productivo de cultivo de café a libre exposición y con sistemas agroforestales, que equivalen a 20 documentos y el 39.39% corresponden a estudios con sistemas agroforestales, que equivalen a 12 documentos, como se observa en la figura 5.



**Figura 6.** Porcentaje de documentos que aplican a la investigación, discriminados por sistemas evaluados.

## **9.2 Análisis comparativo de almacenamiento de carbono entre los sistemas seleccionados.**

Con el fin de efectuar el análisis comparativo entre los sistemas seleccionados, se realizó una revisión detallada de los 20 estudios que reunieron los criterios de selección para la presente investigación, los cuales corresponden a estudios sobre captura de carbono en sistema agrícola productivo de cultivo de café a libre exposición y con sistemas agroforestales; se clasificaron por país, objetivo, tipo de sistema utilizado, parámetro establecido para la medición de carbono (Ej: altitud, altura árboles, área basal, profundidad del suelo, especies forestales, área de estudio, entre otros) y componente de almacenamiento, con el fin de lograr un análisis integral acorde a los resultados encontrados en cada estudio realizado.

Inicialmente se seleccionaron 11 estudios y una vez se dio inicio a la consolidación de datos obtenidos en cada uno de ellos, se encontró que dos de ellos, no contenían los datos puntuales de sus resultados, sólo los describían de manera general, lo que imposibilitó su consolidación en la tabla de datos, por lo que se tomó la decisión de



incluir en los criterios de selección, dos estudios que contuvieran información de sistemas agroforestales solamente, quedando una relación de diez (10) estudios que tuvieron en cuenta parámetros tales como diversidad de especie forestal, edad de especie forestal bajo estudio, altura de los árboles en el SAF, área basal, altitud (a.s.n.m), diversificación del sistema de Café bajo estudio, cobertura forestal, Tipo de Cultivo y ubicación (Mono-Poli) y Fertilización natural y química para fijación de N<sub>2</sub>, profundidad del suelo, entre otras, que permiten efectuar una comparación entre ellos, (ver Anexo 2).

Para el análisis de la información relacionada con los 10 estudios, se construyó una tabla de datos, que permite la comparación de resultados entre cada estudio, con respecto a la concentración de carbono (t C ha<sup>-1</sup>) presente en la biomasa, necromasa, raíces, suelo, % M.O suelo, sobre el nivel del suelo, almacenamiento en el cultivo de café y árboles del SAF, incluido los datos del Total de carbono y Fijación de carbono (t C ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>), la cual se presenta en el Anexo 3.

### **9.2.1 Carbono almacenado en biomasa del suelo y biomasa aérea.**

De acuerdo a los resultados obtenidos en los estudios seleccionados; Castillo et al (2006), en Ecuador, obtuvieron para los contenidos de carbón total del suelo, promedios altos en el SAF Café + Laurel con 78.8 t/ha; seguidos por el SAF Café + Guaba con 72.0 t/ha y el SAF Café Pachaco con 66.9 t/ha. En las plantas de café arábigo, se determinó 1,31 t C/ha en las hojas; 1,49 t/ha en las ramas y 1,32 t/ha en los tallos; en términos porcentuales estos valores corresponden a 31,9; 36,1 y 32,2 por ciento, respectivamente. Las especies forestales utilizadas en el estudio referenciado superaron en contenido de carbono, a las plantas de café; debido a que desarrollaron gran follaje que contribuyó al aumento de su biomasa.

Los promedios generales mantienen la tendencia de superioridad de los árboles de pachaco, en cuanto a la capacidad de almacenamiento de carbono en su biomasa aérea, con 251,4 t/ha; resultando estadísticamente superiores al contenido de carbono de los

árboles de guaba en los que se registraron 55,3 t/ha y de laurel con 38,5 t/ha. Esto debido muy probablemente, a las características específicas de la especie, como alta producción de follaje, crecimiento rápido, fuste grueso que contribuyen al aumento de la biomasa y por ende al carbono aéreo.

En sistemas agroforestales con café, en el Valle central de Costa Rica, Ávila (2000), determinó los mayores contenidos de carbono en el suelo (perfil 0–30 cm), en el sistema café + poró de 10 años de edad (184,43 t/ha), seguido de café + *Eucalyptus deglupta* (6 años) con (161 t/ha), café *Coffea arabica* a pleno sol con (153.88 t/ha) y en menor contenido, café + *Eucalyptus deglupta* de 8 años (108,63 t/ha); poniendo en evidencia la importancia del suelo; esto, pudo ser debido a la influencia en el depósito de residuos que poseen los árboles de poró, considerando también que el poró es un árbol de servicio y de mayor edad, mientras el eucalipto es un árbol maderable y de edad inferior con referencia al poró.. Los contenidos de materia orgánica en el suelo variaron entre 7.2% en el sistema café eucalipto de 8 años y 12.2% para café-poró y café a pleno sol.

Igualmente, Castro en el año (2017), reportó en los sistemas café + Gravilia, valores altos de (186,07 t/ha); café + Poró con (176,11 t/ha); café + Aguacate con (159,34 t/ha) y *Coffea arabica*, en menor proporción con (118,17 t/ha). Aguirre (2006), en México, obtuvo en un Policultivo Tradicional (152.12 t/ha), en monocultivo bajo sombra (117,35 t/ha) y en monocultivo café natural (87,97 t/ha), siendo este sistema el de menor contenido de carbono total del suelo.

Hergoualc'h et al. (2012), encontraron en SAF con *Inga densiflora* y en monocultivo de café a pleno sol, luego de siete años de establecidos, valores similares en cuanto al contenido de carbono en el suelo (111,29 t C·ha<sup>-1</sup> vs. 110,11 t C·ha<sup>-1</sup>), respectivamente; en el perfil del suelo 0- 40 centímetros. En la plantación de café sombreado más del 50% del C acumulado en la fitomasa se localizó en los árboles *Inga* spp y la acumulación de C en la fitomasa total fue 2,3 veces mayor en el cafetal sombreado que en el monocultivo. Durante los primeros 7 años después de la siembra, la media anual de acumulación de carbono sobre el suelo (plantas de café, árboles y hojarasca dividida por

la edad de las plantaciones) fue de  $1.4 \pm 0.1$  y  $3.6 \pm 0.1$  Mg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en las plantaciones de CM y C, respectivamente. El balance neto de GEI a escala del suelo, indican que el suelo fue una fuente neta de gases de efecto invernadero. A nivel de plantación, ambos tratamientos (CIn - CM), fueron sumideros netos de GEI. Los resultados indicaron una tasa neta de absorción de GEI aproximadamente 4 veces mayor en el sistema agroforestal CIn que en el monocultivo CM.

El almacenamiento de carbono depende de las condiciones climáticas; como también de la distribución de carbono en el ecosistema, donde interviene la densidad de plantación, tipo de árboles que conforma el sistema, capacidad de descomposición y presencia de actividad microbiana; factores que promueven una estabilidad del flujo del carbono.

A diferencia de los estudios relacionados en la presente investigación, Hergoualc'h et al. (2012) calculó el carbono del suelo a profundidades entre 0-10cm, 10-20cm, 20-30cm, 30-40cm y el carbono total de 0-40cm; y los aplicó para ambos sistemas, evidenciándose que, a mayor profundidad, menor contenido de carbono. Para el caso del monocultivo de café a pleno sol, obtuvo un valor inicial de (29,67 t/ha) a una profundidad entre 0 y 10cm del suelo y un valor final de (24,04 t/ha) a una profundidad entre 30 y 40cm; la misma situación se evidenció para el sistema SAF con *Inga densiflora*, donde se obtuvieron valores entre 32,08 t/ha y 24,66 t/ha; siendo este último sistema, el que obtuvo valores más altos de carbono en el suelo, especialmente a 0-10 y 10-20cm de profundidad del suelo. La tasa de agotamiento de las existencias de C del suelo en el monocultivo fue mucho mayor que el enriquecimiento de la reserva de C del suelo en la plantación sombreada, durante el mismo período. En el monocultivo, las aportaciones de C de la basura fueron mucho menor y no compensó las pérdidas por mineralización.

Según Jandl (2007), se puede demostrar, que existe una gran interacción entre las especies que conforman el sistema agroforestal y el suelo puesto que los altos contenidos de carbono almacenados en este último son el producto del constante y abundante flujo de este elemento aportado por la biomasa vegetal. Por otra parte, es importante anotar que a pesar de que las cantidades de carbono almacenado en el suelo son bastantes altas,

las cifras presentadas podrían estar subestimadas al considerarse solamente los primeros 40 cm de profundidad del suelo y al no considerarse la biomasa radicular, la microfauna y otras formas de vida existentes en el suelo.

Los factores principales que determinan la tasa de acumulación de carbono en el suelo son la cantidad, calidad y la entrada de materia orgánica (Post y Kwon, 2000); al igual que factores como las propiedades físico-químicas del suelo, antecedentes del uso del suelo, dinámica del ingreso y egresos del carbono en los sistemas, entre otros y que los aportes de carbono, surgen principalmente por caída de hojarasca, mortalidad y exudación de raíces finas.

Esto contrasta notablemente con lo reportado por Espinoza et al. (2012), quienes encontraron valores entre 50 t C·ha<sup>-1</sup> y 73 t C·ha<sup>-1</sup>, que corresponden a los sistemas café + Macadamia y café + Plátano respectivamente y que fueron muy inferiores comparados con lo reportado por los anteriores autores. Esto puede ser debido a múltiples factores, lo que podría estar indicando que los suelos han sido manejados de manera inadecuada en el pasado, lo cual ha causado pérdidas de carbono orgánico en el suelo y posibles emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera o que las especies forestales utilizadas en el estudio, le aportaron pocos nutrientes al suelo; también tiene que ver, la historia de uso del suelo, ya que es posible que antes de estos cafetales se tuvieran otros sistemas de uso de mayor reducción de carbono orgánico en el suelo.

El bosque primario representó el sistema que mayor cantidad de carbono almacenado, con un total de 86 Mg·C ha<sup>-1</sup>, representando 24 % del total que tiene el sistema y hasta 3.2 veces más que el sistema café + macadamia.

Según Suarez (2002), los sistemas con mayor cantidad de biomasa y carbono en árboles fueron el sistema de Café Productivo en Abandono (CPAB) y el sistema de Café con Especies Maderables; Los factores que podrían influir en que estos sistemas' tengan mayores cantidades de biomasa y por ende carbono, podrían ser entre otros: la altura, mayor DAP promedio y la edad de estos sistemas, ya que la mayor parte de estos, fueron

establecidas hace más de 20 años, lo cual ha permitido el máximo desarrollo y crecimiento de estos árboles de sombra, algunos de estos árboles parecen haber sido establecidos con la plantación de café, como las Inga spp, y el resto ser remanentes de la vegetación original (bosques), los sistemas de Café Productivo en Abandono CPAB tienen características similares en cuanto a la edad, composición y variedad de los árboles de sombra y café ya que pertenecían a una sola plantación, la cual fue dividida entre sus trabajadores en la década de los 80.

Los sistemas con menor cantidad de biomasa y carbono en los árboles de sombra fueron los sistemas dentro del rango de altura <5 m, Café Joven con Sombra Diversificada (CJSD), Café Productivo con Sombra Diversificada (CPSD) y Café Productivo Inga spp (CPI), ambos dentro del rango de altura de 5-10 m; El hecho que estos cuenten con menor cantidad de biomasa y por ende carbono, se explica por el hecho de ser árboles pequeños recién plantados, los cuales no han desarrollado suficiente biomasa como los árboles de los sistemas con rangos de altura superiores; en los sistemas con rangos de altura <5 m, los árboles de sombra aportaron entre el 1.02 y 2.06% al carbono total del sistema y tienen en promedio 6.4 ( $\pm 1.25$ ) de DAP. Mientras que los árboles de los sistemas con rangos de altura 5-10 m tiene valores intermedios entre los rangos extremos. Por lo que se observa una clara relación entre la altura y el carbono de los árboles, es decir que, a mayor altura de los árboles, mayor carbono almacenado. Los resultados encontrados concuerda con lo encontrado por Romero citado por Escobar et al. (2002) quien determinó una relación entre altura de árboles y fijación de carbono.

Suarez, indica también que, el suelo es la fuente de almacenamiento de Carbono más importante dentro de los sistemas agroforestales de café, el cual aporta entre el 80-95 % del carbono total del sistema; El rango de % MO, contenido en los primeros 25 cm de profundidad del suelo fue de 37-59, mientras que en los subsiguientes 25 cm (25-50 cm) fue, en promedio, 54% ( $\pm 10$ ) inferior a los primeros 25 cm. Es importante mencionar que la materia orgánica de los suelos depende de varios factores, por lo que al realizar comparaciones entre sistemas con diferentes condiciones agroecológicas hay que comparar también los factores que los afectan Según Robert (2002) como lo son la

vegetación, ingreso de residuos, composición de las plantas, factores climáticos, condiciones de temperatura, humedad y las propiedades del suelo como textura; contenido y mineralogía de la arcilla, acidez. Por otro lado, Okeke y Omalito (1992) afirma que la descomposición de la hojarasca contribuye a la fertilidad del suelo a través de la regeneración de nutrientes para las plantas y el mantenimiento de la materia orgánica en el suelo.

En general, se puede observar que tanto la biomasa como el carbono del cultivo de café en los sistemas estudiados es baja en relación a los datos reportados por la literatura, aún cuando las densidades de siembra del cultivo de los sistemas bajo estudio son mayores, el hecho de tener poca biomasa en el café posiblemente se deba a que estos sistemas en general, no tienen el nivel de sombra adecuada para que las plantas alcancen su máximo crecimiento, Alpízar et al., (1985) concluye, que el crecimiento del cafeto y con ello su producción de biomasa, disminuye considerablemente cuando el porcentaje de luz que la planta, recibe es menor a 30%, el máximo crecimiento se logra con valores cercanos a 100% de luz recibida, siempre y cuando factores como fertilización y agua no sean limitante. Otro de los factores podría ser el tratamiento de poda que reciben las plantas de café para impedir el desarrollo de retoños y el crecimiento de la planta a través del corte de las partes terminales con el fin de permitir el desarrollo de nuevas ramas o bandolas y obtener mayores niveles de fructificación por planta, lo cual evita que la planta tenga un desarrollo normal, menor biomasa y por ende menor carbono. En todos los sistemas agroforestales, el café es la fuente que almacena menos carbono al sistema.

Según Jurado et al, 2020, se determinó que T4 (Café-Carbonero), presentó diferencias estadísticas significativas con respecto a los otros tratamientos, con un valor promedio de 10,77 t ha<sup>-1</sup>, y el valor más bajo de almacenamiento de carbono se obtuvo en T1 (Café a libre exposición) con un promedio de 6,64 t ha<sup>-1</sup>. Valores semejantes al T4 (Café-Carbonero), fueron reportados por López (2014) en sistemas con alta densidad de café y árboles de sombrío, donde la vegetación arbórea aporta 8,86 t ha<sup>-1</sup> y las plantaciones de café 2,59 t ha<sup>-1</sup>, sumando un total de 11,45 t ha<sup>-1</sup>; demostrando que las

reservas de carbono son mayores en los sistemas productivos de café con sombra que en plantaciones de café a libre explosión o con poca sombra.

Es importante resaltar que la captura de carbono puede aumentar durante la fase de crecimiento del árbol y disminuir de nuevo después de la cosecha o quema del mismo (Kim et al., 2016). Ochoa et al. (2000) identificaron una relación directa entre el contenido de carbono orgánico en el suelo y la altitud. De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, se evidencia que el carbono captado por los árboles aumenta al aumentar el área basal existente en la plantación, lo que al final se puede traducir como densidad (árboles por hectárea).

Aguirre, 2006; concluyo además que los árboles son también un importante reservorio (30 % del Ct) después del suelo (Callo, 2001). El carbono de la materia orgánica del suelo es el principal reservorio con aproximadamente el 70 % del Ct; asimismo el C en este reservorio es mayor en los sistemas con manejo orgánico CMBS y CPT frente a CN. Lo anterior puede ser resultado de características particulares de los suelos y labores de aplicación de compostas. En la biomasa viva el mayor reservorio de C se encuentra en los árboles con diámetros  $\geq$  a 10 cm, seguido de los arbustos (cafetos). La mayor acumulación de C en la BV, puede estar en función de la densidad de árboles, tipo de especies utilizadas, edad del sistema y numero de estratos presentes (Montagnini y Nair, 2004).

En cuanto a la fijación de carbono, Andrade, 2014; encontró que la tasa media del SAF con nogal ( $4,37 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ) superó estadísticamente ( $P\leq 0,05$ ) al resto de los sistemas de producción de café, y dentro de éstos, los árboles del dosel de sombra representaron el componente de almacenamiento de carbono más importante ( $3,57$  y  $1,20 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  para el nogal y caucho, respectivamente). Asimismo, al totalizar la tasa de fijación anual de los SAF con las dos especies arbóreas (*C. alliodora* y *H. brasiliensis*) se obtuvo un valor mucho mayor que el de aquellos sistemas sin árboles ( $2,97$  vs.  $0,63 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ).

Dada la baja o nula permanencia del carbono almacenado en las plantas de plátano, por la ausencia de estructuras leñosas, se consideró que su fijación de carbono era cero; de esta manera, al comparar la fijación en los árboles con relación a la de los cafetos, se puede determinar que los árboles contribuyen con aproximadamente el 66 % de la fijación de carbono en estos sistemas de producción de café. Con relación a las plantas de cafeto, el promedio mayor en la tasa de fijación de carbono se encontró en los cafetos del SAF con nogal ( $0,80 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ), pero sin diferencias estadísticas con los demás tratamientos.

En los estudios seleccionados no fue incluida la biomasa de las raíces, a excepción de Jurado et al, 2020 y de Hergoualch et al (2012). Sin embargo, este compartimiento puede representar cantidades significativas de biomasa y por lo tanto de carbono; existe poca información sobre la biomasa en las raíces por el trabajo extensivo que representan las mediciones. Por su parte, Ingaramo et al., (2003) y Henríquez et al., (2011) establecieron la relación directa que existe entre la penetración de raíces y el suelo, donde una disminución del espacio poroso genera disminución en el desarrollo radical.



### **9.3 Eficiencia en la producción de biomasa aérea y subterránea entre los sistemas seleccionados.**

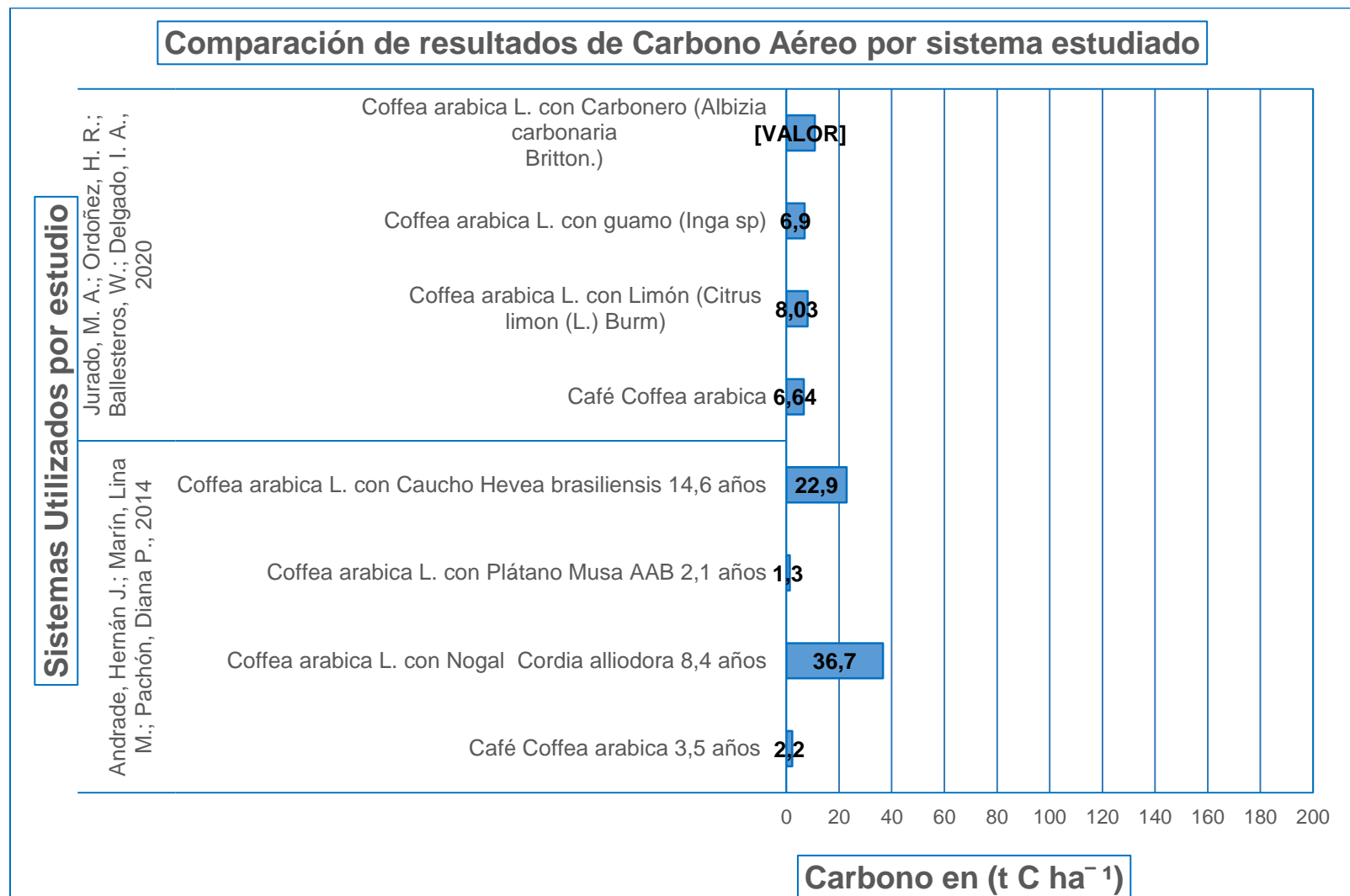
Se efectuó un análisis comparativo entre los estudios que calcularon a través de la biomasa aérea y subterránea, el carbono almacenado ( $\text{t C ha}^{-1}$ ); evidenciándose que los mayores resultados se encontraron en la biomasa del suelo, por su gran aporte y contenido de materia orgánica que contribuye a mayor captura y almacenamiento de carbono en el suelo, como se puede apreciar en las figuras 7, 8 y 9 respectivamente; las cuales se graficaron acorde a los parámetros evaluados en cada estudio, permitiendo en algunos casos, comparar el carbono aéreo y subterráneo o del suelo, como lo fueron para (Suárez, 2002; Ávila, 2000; Espinoza et al, 2012 y Castillo et al, 2006); comparar sólo el carbono aéreo (Andrade et al, 2014 y Jurado et al, 2020) y el carbono del suelo (Castro, 2017; Aguirre, 2006 y Hergoualc'h et al, 2012).

El contenido de carbono en la Materia Orgánica del Suelo es más sobresaliente comparado con el carbono en la biomasa aérea, teniendo en cuenta el gran aporte de nutrientes que genera la hojarasca, residuos vegetales, material vegetal muerto al suelo. La biomasa aérea es determinada por las especies forestales, densidad, edad de los árboles y el manejo silvicultura que se les realice, en donde, un árbol que requiera podas de tratamiento, va a retener menor carbono. Los autores concluyeron que el suelo es el principal reservorio y que la cantidad de Carbono almacenado en cada SAF dependen del clima, las condiciones edáficas y el manejo que se brinde al sistema (Ávila et al., 2001).

#### **9.3.1 Carbono Aéreo.**

Acorde con la figura 6, los resultados de captura de carbono aéreo son bajos, evidenciándose un leve incremento en los SAF de Café con las especies forestales de Carbonero ( $10,77 \text{ t C ha}^{-1}$ ), Caucho ( $22,9 \text{ t C ha}^{-1}$ ) y Nogal, siendo esta última la más representativa con ( $36,5 \text{ t C ha}^{-1}$ ); el monocultivo de Café a plena exposición solar, en ambos estudios obtuvo ( $2,2$  y  $6,64 \text{ t C ha}^{-1}$ ) y el SAF de café con plátano ( $1,3 \text{ t C ha}^{-1}$ )

respectivamente, siendo los más bajos resultados. El incremento de la biomasa aérea depende de factores como el patrón de crecimiento, la dinámica de regeneración, el tipo de especies, entre otros.

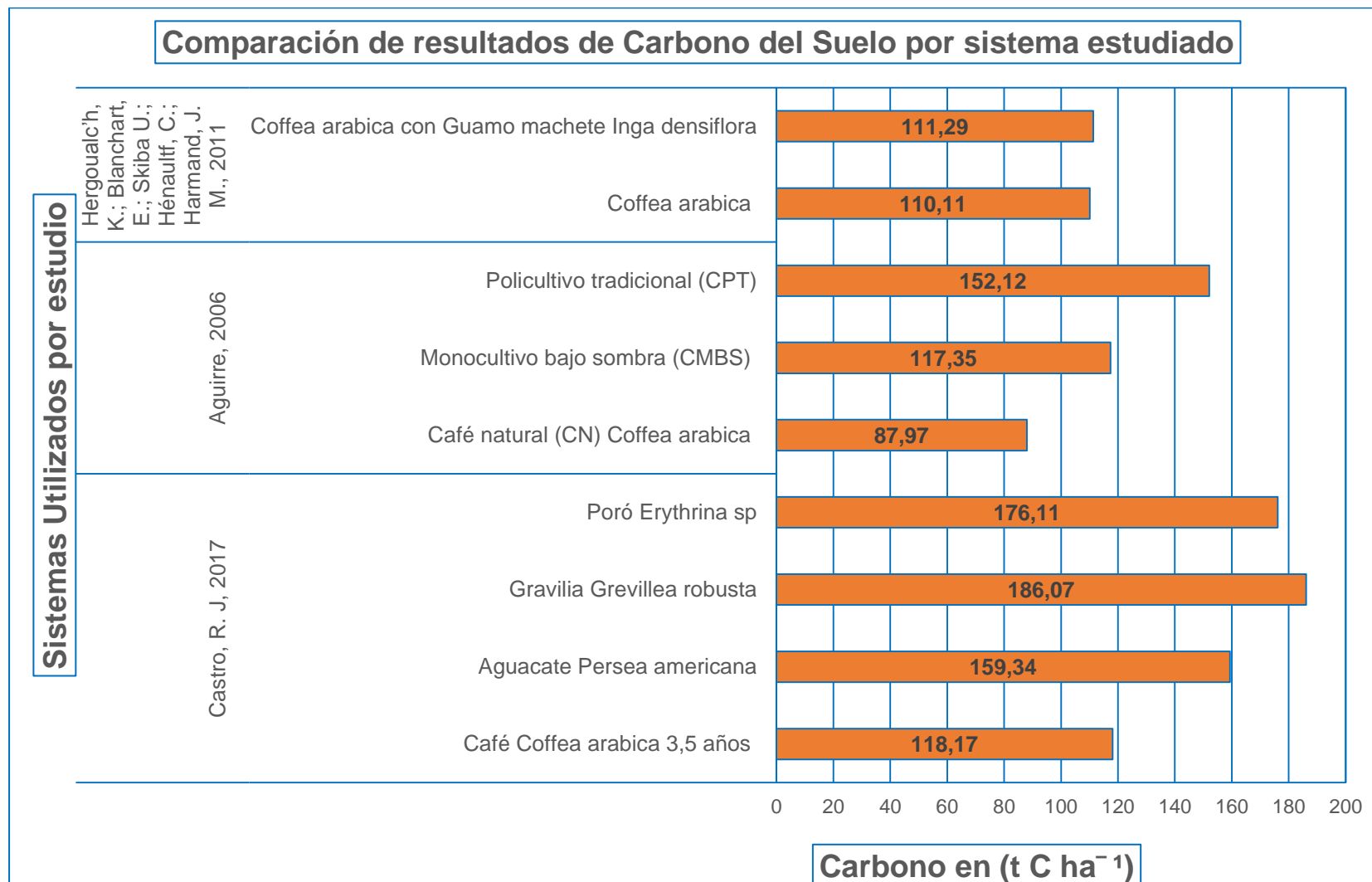


**Figura 7.** Comparación de resultados de carbono Aéreo (t C ha<sup>-1</sup>) por sistema estudiado.

### 9.3.2 Carbono Suelo.

En la figura 7, se muestran los resultados de captura de carbono en el suelo, que comparados con el carbono aéreo, fueron superiores; encontrándose valores altos para las especies como el Poró *Erythrina sp* con (176,11 t C ha<sup>-1</sup>), el Aguacate *Persea americana* con (159,34 t C ha<sup>-1</sup>), Gravilia *Grevillea robusta* con (186,07 t C ha<sup>-1</sup>) y el Policultivo tradicional (CPT) con (152, 12 t C ha<sup>-1</sup>); el monocultivo de Café presentó el menor valor con (87,97 t C ha<sup>-1</sup>).

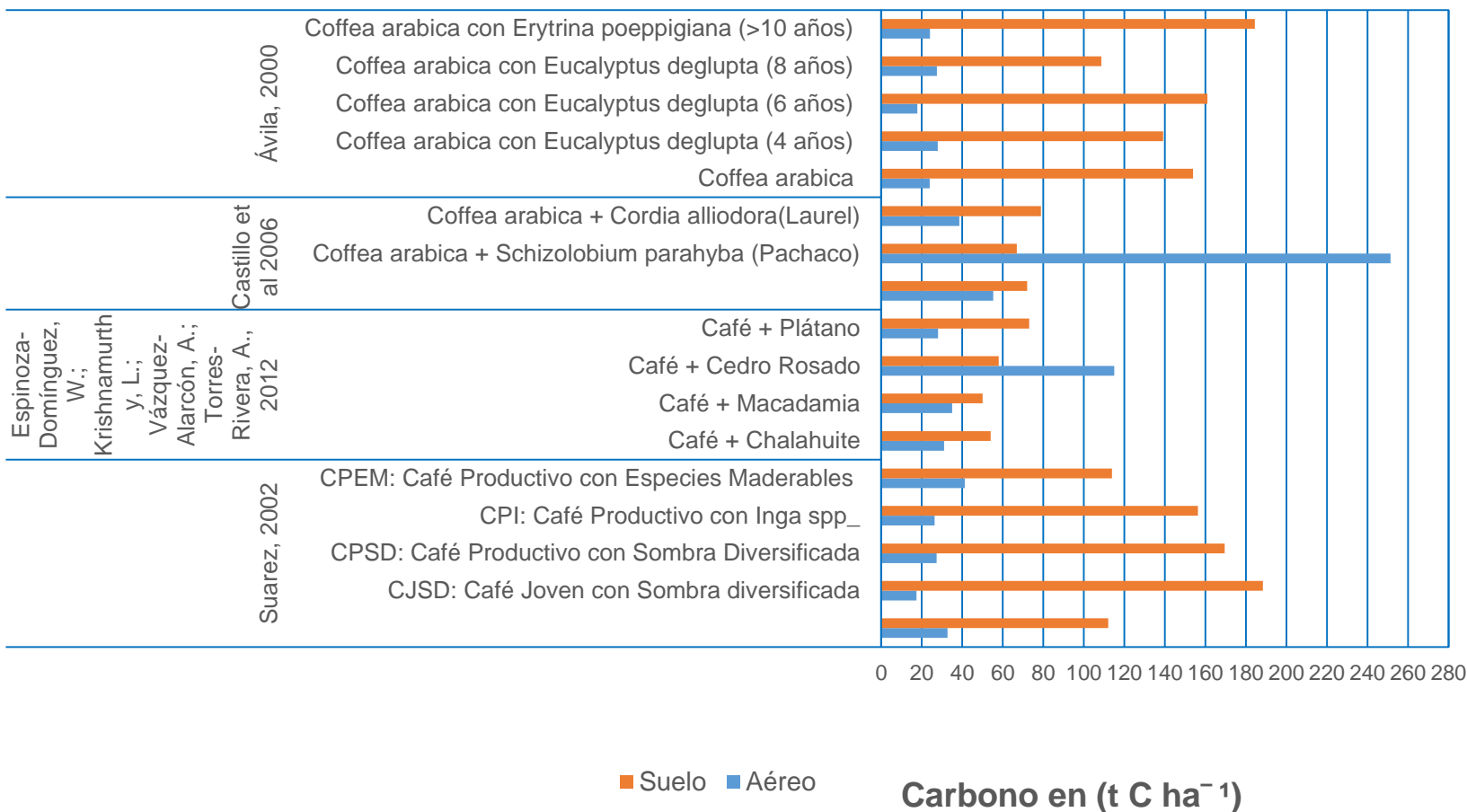
Más evidente aún, se muestra en la figura 8, la gran diferencia entre los resultados obtenidos en los estudios de carbono aéreo comparados con carbono del suelo, donde la biomasa del suelo es superior, siendo hasta seis veces más que la biomasa aérea, tan sólo se presentó dos casos, en donde las especies Pachaco y Cedro Rosado superaron los valores del carbono del suelo capturado para esos sistemas; con gran probabilidad en que sean especies que aportan gran cantidad de biomasa en sus ramas y hojas.



**Figura 8.** Comparación de resultados de carbono del Suelo (t C ha<sup>-1</sup>) por sistema estudiado.

## Comparación de resultados de Carbono Aéreo y del Suelo por sistema estudiado

Sistemas Utilizados por estudio



**Figura 9.** Comparación de resultados de carbono del Suelo (t C ha<sup>-1</sup>) por sistema estudiado.

## 10 CONCLUSIONES

- De acuerdo a lo encontrado en la información recopilada, los sistemas cafeteros son fuentes importantes de almacenamiento de carbono; los principales componentes de almacenamiento de carbono en el uso de la tierra son el carbono orgánico del suelo (COS) y la biomasa aérea.
- A pesar de que la investigación se enfocó hacia el análisis de los sistemas agroforestales con café y monocultivo de café a plena exposición solar; en la revisión documental se encontró que algunos autores tuvieron en cuenta otro tipo de sistemas para ser comparados con éstos, ejemplo Bosque Natural secundario o potreros; arrojando que cuando existen mayores coberturas vegetales como un bosque natural, donde hay diversidad de especies, diferentes estratos, mejores condiciones ambientales y más aporte de nutrientes; hay un aumento significativo de biomasa y de carbono capturado; siendo éste, mayor a un sistema agroforestal; situación diferente ocurrió con el sistema de potreros, donde es poca la cobertura vegetal, prácticamente pastos o no existe cobertura y además con signos de procesos erosivos por la actividad ganadera; se obtienen valores muy bajos de carbono o cero, por la poca biomasa generada y por el arrastre de nutrientes del suelo causados por la erosión.
- Con lo anterior, se concluye que un sistema con mayor cobertura vegetal, con mayor diversidad de especies, va a lograr que exista mayor captura y almacenamiento de carbono, mientras que un sistema con poca o nula cobertura, con mayor exposición al sol, poca acumulación de materia orgánica en el suelo, se van a encontrar resultados muy bajos de Carbono.
- Los suelos de los sistemas agroforestales con café son depósitos importantes de carbono, algunos estudios mostraron que este almacenamiento de carbono en el suelo puede variar de acuerdo con las condiciones ambientales, la profundidad del suelo, las características físico químicas, el tipo de arreglo y manejo

agroforestal, el uso del suelo, entre otros y su gran aporte es debido a la acumulación de materia orgánica proveniente de la biomasa vegetal.

- La muestra documental para la presente investigación fue representativa, logrando tener en cuenta estudios a nivel nacional e internacional y bajo diferentes parámetros de investigación, lo que permitió un análisis integral sobre el tema; la cual se encuentra consolidada a través de una base de datos de fácil acceso, que permite seleccionar los estudios que requiera, como por ejemplo, sólo los que utilizaron SAF con Café o SAF con monocultivo o simplemente ninguno de los anteriores sino otro tipo de sistemas o información teórica relevante sobre el tema de investigación.
- La compilación de estudios como técnica de revisión documental es una herramienta importante que aporta valiosa información de línea base, para el posterior desarrollo de procesos de investigación del tema estudiado, logrando acceder a información detallada y relacionada con el estudio como lo son título de la investigación, autores, objetivos, metodología, resultados encontrados, sistemas utilizados, entre otros.
- Los sistemas productivos de café asociados a especies forestales y especialmente las leñosas, son de gran viabilidad frente a la captura de carbono, siendo este un servicio ambiental a tener en cuenta en el manejo técnico del cultivo, con el fin de generar ingresos a través del pago por servicios ambientales (PSA), tales como los mercados de carbono que mejoran los medios de sustento de las comunidades locales y la aplicación de otras estrategias como la venta de bonos de carbono, la exención de impuestos.



## **11 RECOMENDACIONES**

Para este tipo de análisis, dado la cantidad de estudios que se revisaron, es importante contar con tiempo suficiente, que permita un análisis más detallado e integral, ya que el tiempo utilizado para esta investigación fue muy corto y demandó más horas de trabajo de lo habitual, para poder lograr el cumplimiento de los objetivos planteados.

Se considera muy importante, el poder realizar un análisis, vinculando otros tipos de sistemas productivos y naturales, que permitan efectuar una comparación entre ellos y determinar su potencial en la implementación de programas como el Pago por Servicios Ambientales, o reducción de impuestos a predios, entre otros.

Realizar estudios sobre el potencial del almacenamiento de carbono en los sistemas agroforestales de café y en otro tipo de sistemas productivos, localizados en diferentes zonas del país según tipo de suelo, gradientes altitudinales y longitudinales y sistema de producción.

## 12 BIBLIOGRAFIA

Aguirre, C. M. 2006. Servicios Ambientales: Captura de carbono en sistemas de café bajo sombra en Chiapas, México. Universidad Autónoma Chapingo, México. Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. 91p.

Andrade, Hernán J.; Marín, Lina M.; Pachón, Diana P. 2014. Fijación de carbono y porcentaje de sombra en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el Líbano, Tolima, Colombia. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Barquisimeto, Venezuela. 7p.

Alpízar, L; Fassbender, HW; Heuveldop, J; Enríquez, GA; Folster, H. 1985. Sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) con laurel (*Cordia alliodora*) y con poró (*Erythrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica. I. Biomasa y reservas nutritivas. Turrialba 35:233-242.

Ávila, V.G. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra a pleno sol, sistemas agropastoriles y pasturas a pleno sol. 2000. Turrialba: CATIE. Escuela de posgrado. Tesis magister en agroforestería tropical. 99 p

Ávila, G., Jiménez Otárola, F., Ibrahim, M., Beer, J., 2001. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. Agroforestería en las Américas 8, 32–35.

Beer J.; Harvey C. A.; Ibrahim M.; Harmand J. M.; Somarriba E. Service functions of agroforestry systems 2003. In: Congress proceedings. XII world forestry congress: Forests, source of life. Forests for the planet. Québec: Bibliothèque

Nationale du Québec, p. 417-424. Congrès forestier mondial. 12, 2003-09-21/2003-09-28, Québec, Canada.

Brown, S.; Lugo, A. E. 1884. Biomass of Tropical Forests: A New Estimate Based on Forest Volumes. Science, Vol. 223, Issue 4642, pp. 1290-1293. DOI: 10.1126/science.223.4642.1290.

Callo, Concha D. A. 2001. Cuantificación del carbono secuestrado por algunos sistemas agroforestales y testigos en tres pisos ecológicos de la Amazonia del Perú. Universidad Autónoma Chapingo. Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. México. 72 p.

Castillo, R. C., Duicela, L. A., Chamba, H. M. 2006. Memorias X Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Universidad Nacional de Loja, Ecuador, programa de Innovación Tecnológica del Consejo Cafetalero Nacional COFENAC. 15p.

Castro, R. J. 2017. Almacenamiento de carbono y análisis de rentabilidad en sistemas agroforestales con *coffea arabica* (l.) en la zona de Los Santos, Costa Rica. 93p.

Cubero, J. y Rojas, S. 1999 Fijación de carbono en plantaciones de melina (*Gmelina arborea* Roxb.), teca (*Tectona grandis* L.f.) y pochote (*Bombacopsis quinata* Jacq.) en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, Costa Rica.

Cuéllar, N.; Rosa, H.; González, M. 1999. Los servicios ambientales del agro: El caso del café de sombra en El Salvador. Prisma 34:1-16.

DeFries, R.; Chard, F.; Brown, S.; Herold, M.; Murdiyarso, D.; Schlamadinger, B.; Souza Jr, C. 2007. Earth observations for estimating greenhouse gas emissions from

deforestation in developing countries. Environmental Science & Policy, Volume 10, Issue 4, June 2007, Pages 385-394. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2007.01.010>.

Duncan, P; Jurgen, B; Bruening, F; Burguess, P; Cabarde, B; Cassells, D; Douglas, J; Gilmour, D; Hardcastle, P; Hartshorn, G; Kaimowitz, D; Kishor, N; Leslie, A; Palmer, J;

Espinoza D., W.; Krishnamurthy, L.; Vázquez A., A.; & Torres R., A. 2012. Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. pp. 57-70. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 18(1).

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia - FNC. 2013. El comportamiento de la industria Cafetera Colombiana 2012. Manizales.

Fischer, M.J; Trujillo, W. 1999. Fijación de carbono en pastos tropicales en sabanas de suelos ácidos neotropicales. In Seminario Internacional Intensificación de la Ganadería Centroamericana: Beneficios Económicos y Ambientales. (1999, Turrialba, Costa Rica). Turrialba, Costa Rica: FAO – CATIE, SIDE. p. 115 – 135.

Fournier, L.1996. Fijación de carbono y diversidad biológica en el agroecosistema cafetero. Boletín PROMECAFE.(IICA).No 71:7-13.

González, J. 2013. Estimación de carbono almacenado en agroecosistemas de café (*Coffea arabica*) de dos edades y en tres pisos ecológicos. Universidad Agraria de la Selva. Tingo María. 102p.

Henríquez, C., Ortiz, O., Largaespada, K., Portugués, P., Vargas, M., Villalobos, P. & Gómez, D. 2011. Determinación de la resistencia a la penetración, al corte tangencial,

densidad aparente y temperatura en un suelo cafetalero, Juan Viñas, Costa Rica. Rev

Agronomía costarricense 35(1): 175-184.

Hergoualc'h, K., Blancart, E., Skiba, U., Henault, C. & Harmand, J. 2012 Changes in carbon stock and greenhouse gas balance in coffee (*Coffea arabica*) monoculture versus an agroforestry system with *Inga densiflora*, in Costa Rica. *Revista Agric Ecosyst Environ* 148 (1):102–110.

Ingaramo, O. E.; Paz G. A.; Dugo, P. M. 2003. Evaluación de la densidad aparente en

diferentes sistemas de laboreos de suelo, en el NO de la Península Ibérica. Universidad

Nacional del Nordeste. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas. 4 p

Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC. 2007. Climate change: the physical science basis. Cambridge University Press, Cambridge, UK. En Pachauri, R.K. & A. Reisinger. (eds.). Ginebra: IPCC. 104 p.

Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC. 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. 11-14.

Jandl, R.; Lindner, M.; Vesterdal, L.; Bauwens, B.; Baritze, R.; Hagedorn, R.; D, Johnson.; K, Minkinen.; Byrne, K. A. 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration?. *Geoderma*, Volume 137, Issues 3–4, Pages 253-268. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.09.003>.

Jurado, M. A.; Ordoñez, H. R.; Ballesteros, W.; Delgado, I. A. 2020. Evaluación de captura de carbono en sistemas productivos de café (*coffea arabica* l.), Consacá, Nariño – Colombia. Carbon storage evaluation in coffee systems (*coffea arabica* l.), Consacá, Nariño – Colombia. 16p.

Kim, D., Thomas, A., Pelster, D., Rosenstock, T. & Sanz, A. 2016. Greenhouse gas emissions from natural ecosystems and agricultural lands in sub-Saharan Africa: synthesis of available data and suggestions for further research. *Biogeosciences*, 4789–4809.

López, K. 2014. Determinación de la disponibilidad de carbono según la tipificación de los sistemas agroforestales de café en las sub cuencas del río Yuracyacu y Yanayac, Perú. Tesis de pregrado. Universidad Nacional de San Martín. Moyobamba, Perú 99 p.

Magaña, S. M., Harmand, J. M., Hergoualc'h, K. 2004. Cuantificación del carbono almacenado en la biomasa aérea y el mantillo en sistemas agroforestales de café en el suroeste de Costa Rica. CATIE/CIRAD. 7p.

Montagnini, F. & Nair, P.K.R. 2004. Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. In: *Agroforestry Systems* 61: 281–295.

Nair, P.K.R., 1993. *An Introduction to Agroforestry*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 499p.

Ochoa, G; Oballos. J; Sanchez. J; Sosa. J; Manrique. J; Velasquez. J. 2000. Variación del carbono orgánico en función de la altitud. Cuenca del Río Santo Domingo, MeridaBarinas, Venezuela. *Rev. Geog. Venez.* 41 (1). 71-87. of Wales. 224 p.

Okeke, A. I.; Omaliko, C. P.E. 1992. Leaf litter decomposition and carbon dioxide evolution of some agroforestry fallow species in southern Nigeria. *Forest Ecology*

and Management, Volume 50, Issues 1–2, Pages 103-116.  
[https://doi.org/10.1016/0378-1127\(92\)90317-3](https://doi.org/10.1016/0378-1127(92)90317-3) .

Phillips, O. L., N. Y. Malhi, P. Higuchi, V. Nuñez, R. M. Vazquez, S. Laurence, L. V. Ferreira, M. Stern, S. Brow y J. Grace. 1998. Changes in the carbon balance of tropical forest: evidence from long term plots. *Science* 282: 439-442.

Post, W.M. and Kwon, K.C. 2000 Soil Carbon Sequestration and Land-Use Change: Processes and Potential. *Global Change Biology*, 6, 317-327.

Robert, M. 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informes sobre recursos mundiales de suelos (FAO). No. 96. Universidad Nacional Agraria, (UNA), Nicaragua. Centro Nacional de Investigación y Documentación Agropecuaria, (CENIDA).

Romero A., Y.; Soto P., L.; [et al.]. 2002. Coffee yields and soil nutrients under the shades of Inga sp. vs. multiple species in Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems* 54(3):215-224. 2002.

Ruiz, F., & Somarriba, A. 2002. Evaluación del efecto de la práctica de no quema en el almacenamiento de carbono y la fertilidad de suelos en las comunidades de las cámaras y sabana larga, Estelí, Nicaragua. Managua: Universidad Centro Americana. 56 p.

Schimel, D.S. 1995. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle: *Global Change Biology* 1: 77-91.

Segura, M. 1997. Almacenamiento y fijación de carbono en *Quercus costaricensis*, en un bosque de altura en la Cordillera de Talamanca, Costa Rica. Tesis Lic. Cs For, Heredia, Costa Rica., UNA. 127 p.

Segura, M. 1999. Valoración del servicio de fijación y almacenamiento de carbono en bosques privados en el Area de Conservación Cordillera Volcánica Central, Costa Rica. Tesis Mag Sc. CATIE, Turrialba. Costa Rica. 120 p.

Stevenson, F. J. 1994. Humus chemistry: Genesis, composition, reactions. New York, NY. John Wiley and Sons.

Suárez, D. A. 2002. Cuantificación y valoración económica del servicio ambiental almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café en la Comarca Yassica Sur, Matagalpa, Nicaragua. Centro Agronómico Tropical de Investigación Y Enseñanza CATIE - programa de enseñanza para el desarrollo y la conservación escuela de posgraduados. 131p.

Trexler, M. C. y C. Haugen. 1995. Keeping it Green: Tropical Forestry Opportunities for Mitigating Climate Change, World Resources Institute. Washington D.C.

Young, A., 1997. Agroforestry for Soil Management, 2nd ed. CAB International, Wallingford, UK, 320 pp.

## **12.1 Webgrafía**

PK (Protocolo de Kyoto).1997. [http://unfccc.int.int/essential\\_backgroun d/kyoto/items/1351.php](http://unfccc.int.int/essential_backgroun d/kyoto/items/1351.php).



## **11 ANEXOS**

**Anexo 1. Base de datos de los estudios consultados y relacionados con captura y Almacenamiento de carbono en Sistemas de Monocultivo de Café y Sistemas Agroforestales.**

**Anexo 2. Relación de estudios consultados y priorizados sobre captura y Almacenamiento de carbono en Sistemas de Monocultivo de Café y Sistemas Agroforestales.**

No.	Nombre de la Investigación	Autor	Año	Objetivo de la Investigación	País	Sistemas Utilizados	Componentes de almacenamiento de carbono	Parámetro establecido para la medición de carbono
1	Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol.	Ávila, G.	2000	Cuantificar el carbono fijado y almacenado en sistemas agroforestales con café: <i>Coffea arabica</i> - <i>E. deglupta</i> y <i>C. arabica</i> <i>Erythrina poeppigiana</i> y en los sistemas silvopastoriles <i>Brachiaria brizantha</i> - <i>Acacia mangium</i> , <i>B. brizantha</i> - <i>Eucalyptus deglupta</i> en Costa Rica y Cuantificar el carbono almacenado en un sistema de café a pleno sol ( <i>C. arabica</i> ), en un sistema de pasto mejorado ( <i>B. brizantha</i> ) y pasto natural ( <i>Schaefferia indica</i> ).	Costa Rica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Coffea arabica</i> con <i>Eucalyptus deglupta</i> de cuatro años de edad.</li> <li>• <i>Coffea arabica</i> con <i>Eucalyptus deglupta</i> de seis años de edad.</li> <li>• <i>Coffea arabica</i> con <i>E. deglupta</i> de ocho años de edad.</li> <li>• <i>Coffea arabica</i> con <i>E. poeppigiana</i> &gt; 10 años de edad.</li> <li>• <i>Coffea arabica</i> a plena exposición solar.</li> </ul>	Árbol, cafeto, hojarasca y suelo para SAF con Café.	Edad especie forestal bajo estudio
2	Cuantificación y valoración económica del servicio ambiental almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café en la Comarca Yassica Sur, Matagalpa, Nicaragua.	Suárez, D. A.	2002	Cuantificar y valorar económicamente el servicio ambiental almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales (SAF) de café de la Comarca Yassica Sur, Matagalpa Nicaragua.	Nicaragua	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Café Joven con Sombra Diversificada (CJSD).</li> <li>• Café Productivo con Sombra Diversificada (CPSD).</li> <li>• Café Productivo con <i>Inga spp</i> (CPI).</li> <li>• Café Productivo con Especies Maderables (CPEM).</li> <li>• Café Productivo en Abandono (CPAB).</li> </ul>	carbono total almacenado en los SAF y en las fuentes de almacenamiento (árbol, café, hojarasca y suelo) a diferentes rangos de altura de los árboles de sombra.	Altura especie forestal y Diversificación del sistema de Café bajo estudio

3	Cuantificación del carbono almacenado en la biomasa aérea y el mantillo en sistemas agroforestales de café en el suroeste de Costa Rica.	Magaña, S. M., Harmand, J. M., Hergoualc'h, K.	2004	Cuantificar el carbono almacenado en la fitomasa aérea (biomasa viva y mantillo) de diferentes sistemas agroforestales de café en la zona Pacífico Sur de Costa Rica.	Costa Rica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Coffea arabica</i> con <i>Eucaliptus deglupta</i>.</li> <li>• <i>Coffea arabica</i> con <i>Terminalia ivorensis</i>.</li> <li>• <i>Coffea arabica</i> con <i>Erythrina poeppigiana</i>.</li> <li>• <i>Coffea arabica</i> a plena exposición solar.</li> </ul>	Biomasa de café, mantillo, especies arbóreas y El carbono total en el suelo.	Diversidad de especie forestal
4	Servicios Ambientales: Captura de carbono en sistemas de café bajo sombra en Chiapas, México.	Aguirre, C. M.	2006	Caracterización ambiental de tres sistemas de producción de café bajo sombra con potencial para captura de carbono.	México	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monocultivo bajo sombra (CMBS).</li> <li>• Policultivo tradicional (CPT).</li> <li>• Café Natural (CN) a plena exposición solar. (<i>Cedrela mexicana</i>, <i>Inga edulis</i>, <i>Coffea arabica</i>).</li> </ul>	Biomasa viva: árboles, arbustos, hierbas, raíces (gruesas y finas). Materia orgánica muerta: ramas caídas y mantillo. Materia orgánica del suelo.	Tipo de Cultivo (Mono-Poli) y Diversidad de especie forestal
5	Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales con Café arábigo y Cacao, en dos zonas agroecológicas del Litoral Ecuatoriano.	Castillo, R. C., Duicela, L. A., Chamba, H. M.	2006	Cuantificar el carbono fijado y almacenado en sistemas silvoagrícolas con café y cacao; y, estimar el valor económico del servicio ambiental de fijación y almacenamiento de carbono, en las zonas de Pichilingue (Los Ríos) y Caluma (Bolívar).	Ecuador	SAF con café, todos de 6,5 años de edad: <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Coffea arabica</i> con <i>Inga edulis</i>.</li> <li>• <i>Coffea arabica</i> con <i>Schizolobium parahyba</i>.</li> <li>• <i>Coffea arabica</i> con <i>Cordia alliodora</i>.</li> </ul>	Suelo, necromasa, biomasa de los cultivos y de las especies forestales y en los sistemas agroforestales.	SAF con café, todos con los mismos años de edad y Diversidad de especie forestal

6	Changes in carbon stock and greenhouse gas balance in a coffee ( <i>Coffea arabica</i> ) monoculture versus an agroforestry system with <i>Inga densiflora</i> , in Costa Rica. Cambios en las existencias de carbono y el balance de gases de efecto invernadero en un café ( <i>Coffea arabica</i> ) monocultivo versus sistema agroforestal con <i>Inga densiflora</i> , en Costa Rica.	Hergoualc'h, K.; Blanchart, E.; Skiba U.; Hénault, C.; Harmand, J. M.	2011	Evaluar el balance neto de GEI en dos cafetales adyacentes, ambos altamente fertilizados (250 kg N ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ): un monocultivo (CM) y un cultivo sombreado por la leguminosa fijadora de N2 especie <i>Inga densiflora</i> (CIn).	Costa Rica	Dos cafetales adyacentes, ambos altamente fertilizados (250 kg N ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ): un monocultivo (CM) y un cultivo sombreado por la leguminosa fijadora de N2 especie <i>Inga densiflora</i> (CIn).	carbono en árboles, cafeto, hojarasca y en el suelo.	Tipo de Cultivo y ubicación (Mono-Poli) y Fertilización natural y química para fijación de N2
7	Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. Carbon stocks in agroforestry systems with coffee plantations.	Espinoza-Domínguez, W.; Krishnamurthy, L.; Vázquez-Alarcón, A.; Torres-Rivera, A.	2012	Estimar el almacén de carbono en sistemas agroforestales (SAF) con base en café en la región de Huatusco, zona de mayor producción de café ( <i>Coffea arabica</i> L.) en el estado de Veracruz, México, a fin de obtener información cuantitativa sobre el potencial de mitigación de carbono en los SAF de la región.	México	SAF con café: • <i>Coffea arabica</i> con Plátano velillo. • <i>Coffea arabica</i> con Macadamia. • <i>Coffea arabica</i> con Cedro rosado ( <i>Acrocarpus fraxinifolius</i> ). • <i>Coffea arabica</i> con Chalahuite. • Bosque Primario. • Potrero con pradera natural.	Biomasa aérea (arbórea, arbustiva, troncos caídos, herbácea y de mantillo).	SAF con café, Diversidad de especie forestal y cobertura

8	Fijación de carbono y porcentaje de sombra en sistemas de producción de café ( <i>Coffea arabica</i> L.) en el Líbano, Tolima, Colombia	Andrade, Hernán J.; Marín, Lina M.; Pachón, Diana P.	2014	Estimar el potencial de fijación y almacenamiento de carbono atmosférico en la biomasa aérea de los sistemas de producción de café más predominantes del municipio del Líbano, Tolima, Colombia.	Colombia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monocultivo café <i>Coffea arabica</i> a plena exposición solar.</li> <li>SAF con café:</li> <li>• <i>Coffea arabica</i> con Plátano (<i>Musa</i> AAB).</li> <li>• <i>Coffea arabica</i> con Nogal cafetero (<i>Cordia alliodora</i>).</li> <li>• <i>Coffea arabica</i> con Caucho (<i>Hevea brasiliensis</i>).</li> </ul>	Se calculó la biomasa aérea total producida por cada una de las especies participantes y la la tasa de fijación de carbono.	Monocultivo y SAF con café y Diversidad de especie forestal
9	Almacenamiento de carbono y análisis de rentabilidad en sistemas agroforestales con <i>coffea arabica</i> (l.) en la zona de Los Santos, Costa Rica.	Castro, R. J.	2017	Determinar cuál es el arreglo qué presenta los mayores beneficios integrales dentro de un sistema agroforestal en la Zona de los Santos; Cuantificar y comparar el carbono fijado por los diferentes componentes en cada sistema evaluado; Comprobar si existe efecto del área basal presente en el SAF-café sobre el carbono fijado y estimar cuál arreglo presenta mayor rentabilidad por medio de los indicadores financieros.	Costa Rica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monocultivo café <i>Coffea arabica</i> a plena exposición solar.</li> <li>SAF con café:</li> <li>• <i>Coffea arabica</i> con Aguacate <i>Persea americana</i>.</li> <li>• <i>Coffea arabica</i> con <i>Grevillea robusta</i>.</li> <li>• <i>Coffea arabica</i> con <i>Erythrina</i> sp.</li> </ul>	carbono en árboles, cafeto, hojarasca y en el suelo.	Monocultivo y SAF con café y Diversidad de especie forestal y Área Basal

10	Evaluación de captura de carbono en sistemas productivos de café (coffea arabica l.), Consacá, Nariño – Colombia. Carbon storage evaluation in coffee systems (coffea arabica l.), Consacá, Nariño – Colombia..	Jurado, M. A.; Ordoñez, H. R.; Ballesteros, W.; Delgado, I. A.	2020	Estimar el carbono almacenado en biomasa aérea y bajo el suelo en el ecotopo 221A correspondiente al municipio de Consacá Nariño.	Colombia	Monocultivo café <i>Coffea arabica</i> a plena exposición solar (T1). SAF con café: • <i>Coffea arabica</i> con Limón (T2). • <i>Coffea arabica</i> con Guamo <i>Inga sp</i> (T3). • <i>Coffea arabica</i> con Carbonero (T4).	Biomasa aérea, carbono en árboles, cafeto, hojarasca y en el suelo.	Monocultivo, SAF con café, Diversidad de especie forestal y Altitud (a.s.n.m)
----	---	--	------	---	----------	---	---	---

**Anexo 3. Estudios seleccionados para análisis comparativo relacionados con captura y Almacenamiento de carbono en Sistemas de Monocultivo de Café y Sistemas Agroforestales.**

ESTUDIOS SELECCIONADOS PARA ANÁLISIS COMPARATIVO DE ALMACENAMIENTO DE CARBONO					carbono en (t C ha <sup>-1</sup> )										
					Aer.	Raíc.	Necrom.	Bioma.	Suelo	%M.O Suelo	Sobre el nivel del suelo	CT	FC (t C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	Almac. cultivo	Almac. arbóreo
					Promedio										
#															
1	Ávila, 2000	Costa Rica	MC	<i>Coffea arabica</i>	23,9			SD	153,88	12,2	10,4	164			
			SAF	<i>Coffea arabica</i> con <i>Eucalyptus deglupta</i> (4 años)	27,9			4	139,13	9,22	12,5	152	1,1	3,96	8,4
				<i>Coffea arabica</i> con <i>Eucalyptus deglupta</i> (6 años)	17,9			2	161	10,7	7,74	167	0,4	5,01	7,1
				<i>Coffea arabica</i> con <i>Eucalyptus deglupta</i> (8 años)	27,5			3	108,63	7,2	12,3	121	0,4	4,13	7,43
				<i>Coffea arabica</i> con <i>Erytrina poeppigiana</i> (>10 años)	24,2			3	184,43	12,2	10,6	195	0,3	4,1	6,6
2	Magaña, 2004	Costa Rica	MC	<i>Coffea arabica</i>							1,2	11,4		10,2	SD
			SAF	<i>Coffea arabica</i> con <i>Eucalyptus deglupta</i>							4,2	28,4		10,2	14
3	Aguirre, 2006	Mexico	MC	Café natural (CN) <i>Coffea arabica</i>				35	87,97	68,8	6,72	130			
			SAF	Monocultivo bajo sombra				47	117,35	70,5	6,28	170			





				<i>Coffea arabica</i> L. con Carbonero (Albizia carbonaria Britton.)	10,8	2,11									
7	Hergouale' h, K.; Blanchart, E.; Skiba U.; Hénaultf, C.; Harmand, J. M., 2011	Costa Rica	MC	<i>Coffea arabica</i>		2,6	1,3		p(0-10cm): 29,67; p(10-20cm): 29,34; p(20-30cm): 27,06; p(30-40cm): 24,04; p(0-40cm):110,11	47,3	8,5	14,1		1,7	
			SAF	Coffea arabica con Guamo machete <i>Inga densiflora</i>		2,7	2,2		p(0-10cm): 32,08; p(10-20cm): 29,07; p(20-30cm): 25,48; p(30-40cm): 24,66; p(0-40cm):111,29	48	13,9	32,4		2	13,9
8	Suarez, 2002	Nicaragua	MC	CPAB: Café Productivo en Abandono	h(>10 m): 32,7			h(>10m): 66,8	h(>10m): 112	h(>10m): 3,7	h(>10m): 3,2	h(>10 m): 144,7		h(>10m): 2,2	h(>10m): 27,3
			SAF	CJSD: Café Joven con Sombra diversificada	h(<5m) : 6,4; h(5-10m): 12,4; h(>10 m): 17,46			h(<5m): 12,9; h(5-10m): 24,17; h(>10m): 38,3	h(<5m): 188,3; h(5-10m): 149,9; h(>10m): 126,2	h(<5m): 5; h(5-10m): 4,9; h(>10m): 4,6	h(<5m): 4,2; h(5-10m): 3; h(>10m): 4,5	h(<5m) : 194,7; h(5-10m): 162; h(>10 m): 143,6. Prom:		h(<5m): 0,2; h(5-10m): 0,6; h(>10m): 0,4	h(<5m): 2; h(5-10m): 8,3; h(>10m): 13,7

											166,7.			
				<i>CPSD: Café Productivo con Sombra Diversificada</i>	h(<5m): 9,2; h(5-10m): 15,6; h(>10m): 27,3			h(<5m): 19,4; h(5-10m): 32,2; h(>10m): 55,3	h(<5m): 169,5; h(5-10m): 137,1; h(>10m): 139,7	h(<5m): 6; h(5-10m): 4,8; h(>10m): 5,5	h(<5m): 5,2; h(5-10m): 5,5; h(>10m): 9,6	h(<5m): 179; h(5-10m): 152,7; h(>10m): 167. Prom: 166,3.	h(<5m): 0,7; h(5-10m): 1; h(>10m): 1,6	h(<5m): 3,7; h(5-10m): 9,1; h(>10m): 16,1
				<i>CPI: Café Productivo con Inga spp_</i>	h(<5m): 6,8; h(5-10m): 14,2; h(>10m): 26,4			h(<5m): 13,6; h(5-10m): 28,28; h(>10m): 53,6	h(<5m): 156,3; h(5-10m): 132,9; h(>10m): 159,6	h(<5m): 5,3; h(5-10m): 5,3; h(>10m): 5,9	h(<5m): 3,9; h(5-10m): 4,3; h(>10m): 6,1	h(<5m): 165; h(5-10m): 147,1; h(>10m): 186. Prom: 166,1.	h(<5m): 1; h(5-10m): 1,5; h(>10m): 2,8	h(<5m): 1,9; h(5-10m): 8,4; h(>10m): 17,5
				<i>CPEM: Café Productivo con Especies Maderables</i>	h(>10m): 41,2			h(>10m): 83,6	h(>10m): 113,9	h(>10m): 4,1	h(>10m): 7,7	h(>10m): 155,1	h(>10m): 1,7	h(>10m): 31,8
9	Espinoza-Domínguez, W.; Krishnamurthy, L.; Vázquez-Alarcón, A.; Torres-Rivera, A., 2012	Mexico	SAF	<i>Café + Chalahuite</i>	31		1,9		54	3,35		85	27	29
				<i>Café + Macadamia</i>	35		0,9		50	4,14		85	27	34
				<i>Café + Cedro Rosado</i>	115		0,3		58	3,82		172	27	114
				<i>Café + Plátano</i>	28		1		73	4,68		101	27	27
10	Castillo et al 2006	Ecuador	SAF	<i>Coffea arabica + Inga edulis (Guaba)</i>	55,3			5	72					
				<i>Coffea arabica + Schizolobium parahyba (Pachaco)</i>	251			3	66,9					

				<i>Coffea arabica</i> + <i>Cordia alliodora</i> ( <i>L aurel</i> )	38,5			4	78,8							
--	--	--	--	---	------	--	--	---	------	--	--	--	--	--	--	--